# مدل سازی و بررسی پارامتریک سیستم ترکیبی پیل سوختی اکسید جامد و میکروتوربین گازی

عاطفه بهزادی فروغ ٬ رامین روشندل ٔ

تاریخ دریافت مقاله: ۹۱/۸/۳۰ تاریخ پذیرش مقاله: ۹۱/۱۱/۳۰

چکیدہ:

برای بهبود عملکرد و افزایش بازده میکروتوربینهای گازی می توان آنها را با پیل سوختی اکسید جامد (SOFC) که دمای عملکردی بالایی دارد، ترکیب نمود. در این مقاله، مدل یک سیستم ترکیبی میکروتوربین گازی و پیل سوختی اکسید جامد ارائه شده است. ظرفیت پیل سوختی نقش موثری در راندمان کلی سیستم ترکیبی دارد. به همین دلیل، اثر تعداد سلول های پیل سوختی اکسید جامد در نظر گرفته شده (ظرفیت پیل سوختی)، بر عملكرد سيستم تركيبي مورد بررسي قرار گرفته است. همچنين اين مقاله اثر ساير پارامترهای مهم و کلیدی را در سیستم تولید توان ترکیبی پیل سوختی اکسید جامد و میکروتوربین گازی مورد ارزیابی قرار می دهد. بررسی و ارزیابی اثر پارامترهای کلیدی این سیستم، در حضور قید محدود کننده دمای گازهای ورودی به میکروتوربین، انجام می شود. نتایج نشان می دهد که با افزایش ظرفیت پیل سوختی در سیستم ترکیبی، راندمان کل این سیستم در ابتدا افزایش مییابد، اما با افزایش بیشتر ظرفیت پیل سوختی، آهنگ افزایش بازده کل سیستم کمتر خواهد بود. همچنین با افزایش ظرفیت پیل سوختی، دمای گازهای خروجی از پیل افزایش یافته و در نهایت، موجب افزایش دمای گازهای ورودی به میکروتوربین ٔ (TIT) می شود. در انتها، تأثیر استفاده از گازهای خروجی از میکروتوربین برای پیش گرمایش سوخت و هوای ورودی به پیل سوختی مورد بررسی قرارگرفته است. نتايج نشان مىدهد كه اعمال مديريت حرارت بر سيستم و بازيافت حرارت مى تواند بازده کلی سیستم ترکیبی را تا ۱۷.۸ درصد افزایش دهد. به این ترتیب، نتایج این پژوهش می تواند اطلاعات ارزشمندی را برای مطالعه سیستم ترکیبی پیل سوختی اکسید جامد-ميكروتوربين گازي فراهمآورد.

كلمات كليدى:

سیستم ترکیبی، پیل سوختی اکسید جامد، میکروتوربین گازی، مدیریت حرارتی

۱) دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده انرژی ۲) هیأت علمی دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده انرژی، ( نویسنده مسئول)

furugh\\%\$A@gmail.com Roshandel@sharif.edu %) Solid Oxide Fuel Cell %) Turbine Inlet Temperature

#### ۱ – مقدمه

پیلهای سوختی، سیستمهای الکتروشیمیایی هستند که انرژی شیمیایی موجود در سوخت را به صورت مستقیم و بدون حضور مرحله احتراقی، به انرژی الکتریکی تبدیل می کنند. در نتیجه، این نوع سیستم ها، بسیاری از محدودیت های مربوط به موتورهای احتراقی را نخواهند داشت و دارای بازده الکتریکی بالایی در تبدیل سوخت به انرژی الکتریکی خواهند بود. در میان انواع پیل های سوختی، پیل سوختی اکسید جامد یکی از بهترین گزینه ها برای تولیدات پراکنده توان می باشد. دمای عملکردی آنها بین ۲۰<sup>°</sup>۲۰ تا ۲<sup>°</sup>۲۰۰ می باشد [۱]. پیل سوختی اکسید جامد به علت داشتن بازده الکتریکی بالا گزینه بسیار مناسبی برای استفاده در سیستم ترکیبی می باشد. با توسعه سیستم های تولید توان پراکنده، میکروتوربین گازی (MGT)، به صورت سریع توسعه پیدا کرده است. از مهمترین ویژگیهای MGT که آن را از توربین های گازی متداول متمایز می کند، میتوان به دارا بودن بازده بالا در توان پایین، بالا بودن دور موتور آن و همچنین امکان تامین تقاضای بار جزیی اشاره کرد که باعث می شود این سیستم بتواند با سیستمی مانند SOFC ترکیب شود.

سیستمهای ترکیبی پیل سوختی اکسید جامد طی سالهای اخیر مورد توجه قرار گرفته اند [۴–۲] و به صورت جامع توسط چدی و باو و همکارانشان [۶ و ۵] بررسی شده اند. ژانگ و همکارانش [۷] راهبردهای مختلف را برای ترکیب سیستم SOFC با دیگر سیستمهای تولید توان مورد بحث قرار دادند. این راهبردها به طور کلی به سه بخش اصلی تقسیم شدهاند که به صورت ترکیب گرمایی مستقیم، ترکیب گرمایی غیر مستقیم و ترکیب سوختی میباشد. در ترکیب گرمایی مستقیم، دو یا چند سیستم تولید توان، سیال کارکردی خود را با هم به اشتراک میگذارند. در ترکیب گرمایی غیر مستقیم، سیالهای کارکردی سیستمها به صورت مجزا در نظر گرفته میشود و تنها حرارت آنها از طریق مبدل حرارتی<sup>۱</sup> بین سیستمهای تولید توان منتقل میشود. همچنین در ترکیب سوختی، سیستم تولید هیدروژن یا احیا کننده سوخت یکی از اجزای ساختار سیستم ترکیبی می باشد. توان تولیدی در اغلب سیستمهای ترکیبیSOFC-GT در بازه چند ده تا چند صد کیلووات است [۹ و ۸]. سیستمهای ترکیبی بزرگتر نیز در چندین مقاله مورد بررسی قرار گرفتهاند. آرسالیس [۱۰] اجزای ساختار سیستم ترکیبی می باشد. توان تولیدی در اغلب سیستمهای ترکیبیSOFC-GT در بازه چند ده تا چند صد استکهای پیل سوختی اکسید جامد با توان WM ۸۸ را در سیستم ترکیبیSOFC-GT در نظر گرفتهاند. آرسالیس [۱۰] ارا] در تحقیقات خود با استفاده از یک مدل دینامیک نشان دادند که سیستم ترکیبیSOFC-GT وابلی گرفتهاند. آرسالیس [۱۰] استکهای پیل سوختی اکسید جامد با توان WM ۵۸ را در سیستم ترکیبیSOFC-GT در نظر گرفتهاند. آرسالیس [۱۰] استکهای پیل سوختی اکسید جامد با توان تولیدی در اغلب سیستم ترکیبیSOFC-GT در نظر گرفته در ایستگویی به استکهای پیل سوختی اکسید جامد با توان WM ۵۸ را در سیستم ترکیبیSOFC-GT در نظر گرفتهاند. آرسالیس [۱۰] ایزهای متغیر با زمان مصرف کننده را دارد. یانگ و همکارانش دادند که سیستم ترکیبیSOFC-GT را در حالت عملکردی نیازهای متغیر با زمان مصرف کننده را دارد. یانگ و همکارانش (۲۲] سیستم ترکیبیSOFC-GT را در حالت عملکردی نیازهای متغیر با زمان مصرف کننده را دارد. یانگ و همکارانش دار ۲]

1) Heat Exchanger

ورودی به توربین<sup>۱</sup>) مورد ارزیابی قرار دادند. کلازی و همکارانش [۱۳] آنالیز اگزرژی را بر روی سیستم ترکیبی پیل سوختی اکسید جامد و میکروتوربین گازی پیاده کردند. لای و همکارانش [۱۴] سیستم ترکیبیSOFC-MGT را با روشهای تجربی مورد بررسی قرار دادند. مطالعه بر روی سیستم تولید توان ترکیبیSOFC-MGT به صورت گستردهای انجام شده و هم اکنون نیز تلاشهایی در زمینه توسعه این سیستم ترکیبی وجود دارد. به عنوان یک فناوری پیشنهادی، سیستم تولید توان ترکیبیSOFC-MGT میتواند پاسخگوی تقاضای رو به رشد سیستمهای انرژی تولید پراکنده با بازده بالاتر و تاثیرات زیست محیطی کمتر باشد.

اگرچه تحقیقات زیادی بر روی سیستم ترکیبی SOFC-MGT وجود دارد، اما اثر تغییر ظرفیت پیل سوختی اکسید جامد (تعداد سلولها)، بر راندمان کلی سیستم ترکیبی مورد ارزیابی قرار نگرفته است. همچنین مقالات کمی پارامتر دمای ورودی توربین (TIT) را به عنوان شرایط قیدی، هنگام بررسی سایر پارامترهای سیستم اعمال کردهاند. در مقایسه با توربینهای گازی متداول، TIT در میکروتوربینها، به دلیل محدودیت فناوری در دسترس برای ساخت میکروتوربین (بویژه پرههای آن) از دمای گازهای ورودی به توربین گازی متداول بسیار کمتر است. در این مقاله، اثر تعداد سلولهای پیل سوختی اکسید جامد در نظر گرفته شده (ظرفیت پیل سوختی)، بر عملکرد سیستم ترکیبی مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین نقش و تأثیر سایر پارامترهای کلیدی سیستم ترکیبی SOFC-MGT، با در نظر گرفتن TIT به صورت یک پارامتر حدی، بر روی عملکرد سیستم ترکیبی ارزیابی شده است. سوخت ورودی در این سیستم متان میباشد که توسط احیا کننده داخلی<sup>7</sup> با استفاده از گرمای آزاد شده توسط واکنشهای الکتروشیمیایی داخل سلول، هیدروژن مورد نیاز سلول پیل را تأمین میکند. در انتها، تأثیر حضور مبدل حرارتی برای بازیافت حرارتی گازهای خروجی از میکروتوربین بررسی میشود. نتایج این

#### ۲ – ساختار سیستم ترکیبی پیل سوختی اکسید جامد – میکروتوربین گازی

شکل ۱، ساختار سیستم تولید توان ترکیبی SOFC-MGT را نشان میدهد. در این ساختار، پیل سوختی اکسید جامد به عنوان سیستم بالادست و میکروتوربین گازی به عنوان سیستم پایین دست عمل میکند، به گونهای که استک پیل سوختی به عنوان یک تامین کننده سوخت برای محفظه احتراق میکروتوربین محسوب میشود. در این پروژه، پیل سوختی لولهای SOFC با سوخت ورودی متان و همچنین هوا به عنوان عامل اکسید کننده انتخاب شده است.

Variable inlet guide vane
 Internal Reforming



شکل۱) ساختار سیستم تولید توان ترکیبی SOFC-MGT

سوخت و هوای متراکم شده (بعد از عبور از کمپرسور سوخت و هوا)، قبل از ورود به استک پیل سوختی، توسط مبدلهای حرارتی پیش گرم می شوند. گاز متان و هوا به ترتیب به آند و کاتد پیل سوختی وارد و گاز متان در آند پیل سوختی احیا و فرآوردههای گازی غنی از هیدروژن تولید می شود. به همین ترتیب، انرژی الکتریکی و حرارت به عنوان محصولات خروجی از پیل سوختی به دست می آید. گازهای داغ خروجی از استک پیل سوختی شامل گاز متان واکنش نداده، گازهای تولیدی در استک پیل سوختی (هیدروژن مصرف نشده، کربن دی اکسید و کربن مونو اکسید) و آب می باشند. این گازهای داغ به محفظه احتراق وارد شده و در آنجا با هوای خروجی از کاتد محترق می شوند. گازهای حاصل می باشند. این گازهای داغ به محفظه احتراق وارد شده و در آنجا با هوای خروجی از کاتد محترق می شوند. گازهای حاصل از این احتراق، وارد توربین شده و پس از انبساط، کار لازم برای ژنراتور الکتریکی را فراهم می کنند. گازهای خروجی از توربین نیز با عبور از مبدلهای حرارتی، سوخت و هوای ورودی به پیل سوختی را پیش گرم می کنند. گازهای خروجی از مبدل حرارتی سوخت به داخل یک بویلر هدایت می شوند تا بخار مورد نیاز برای واکنش های احیای سوخت تولید شود. در این مقاله، تاثیر استفاده از مبدلهای حرارتی و سیستمهای بازیافت حرارتی بر عملکرد سیستم مورد بررسی قرار می گیرد.

۳- مدل ریاضی سیستم ترکیبی پیل سوختی اکسید جامد – میکروتوربین گازی

۳–۱– مدل پیل سوختی اکسید جامد

۳-۱-۱- مدل احيا كننده داخلي

با ورود گاز متان به پیل سوختی دما بالا و در حضور کاتالیت نیکل، واکنشهای رفورمینگ<sup>۱</sup> و شیفت<sup>۲</sup> برای احیای گاز متان و تولید هیدروژن در قسمت الکترود آند پیل سوختی انجام میشود.

N) Methane steam-reforming reactionN) Shift Reaction

معادله واکنش رفورمینگ بخار (۱) و معادله واکنش شیفت (۲) در زیر آورده شده است:

$$CH_{\rm F} + H_{\rm Y}O \to CO + {\rm Y}H_{\rm Y} \tag{(1)}$$

$$CO + H_{\gamma}O \rightarrow CO_{\gamma} + H_{\gamma}$$
 (Y)

فرض می شود این واکنش ها به حالت تعادل شیمیایی رسیده باشند و در این صورت می توان ترکیب محتوای گاز خروجی از استک را بر اساس معادلات تعادل شیمیایی (معادلات ۳ و۴) به دست آورد:

$$K_{pr} = \frac{P_{CO} \times P_{H_{\uparrow}}}{P_{H_{\uparrow}O} \times P_{CH_{\uparrow}}} = \frac{n_{CO} \times n_{H_{\uparrow}}}{n_{H_{\uparrow}O} \times n_{CH_{\uparrow}}} \left(\frac{P_{VOC}}{P_{\bullet}}\right)^{\gamma}$$
( $^{\gamma}$ )

$$K_{pr} = \frac{P_{CO} \times P_{H_T}}{P_{H_TO} \times P_{CH_T}} = \frac{n_{CO} \times n_{H_T}}{n_{H_TO} \times n_{CH_T}} \left(\frac{P_{tOC}}{P_{c}}\right)^{\gamma} \tag{(f)}$$

ثابتهای تعادل KP توسط معادله (۵) در دمای ۲۰°۸۰ محاسبه می شوند. مقادیر ثابتهای A, B, C, D, E مربوط به معادلات (۳) و (۴) در جدول ۱ ارائه شده است.

$$\log K_{\nu} = AT^{*} + BT^{*} + CT^{*} + DT + E \tag{(b)}$$

* / * ///		
واكنش شيفت	واكنش رفورمينگ	ضرایب
0.473 1×111	-7.587171×11-17	А
-7.77479×1 <sup>-۵</sup>	۱.۲۴۰۶۵×۱۰ <sup>-۷</sup>	В
4.58747×15	-7.75787×1*	С
-۳.910++×1+ <sup>-7</sup>	1.90+7X×1+-1	D
1.88+94×1+ <sup>-1</sup>	-8.81892×1+	E

جدول ۱) مقادیر ثابتهای تعادل واکنشهای رفورمینگ و شیفت

معادلات نیم واکنش های الکتروشیمیایی و همچنین واکنش الکتروشیمیایی کلی در پیل سوختی به صورت معادلات (۶، ۷ و ۸) خواهد بود.

$$H_{\gamma} + O^{\gamma -} \to H_{\gamma}O + \gamma e^{-}$$
(2)

$$Y e^{-} + \frac{1}{2} O_{\gamma} \rightarrow O^{\gamma}$$
(Y)

$$H_{\gamma} + \frac{1}{\gamma} O_{\gamma} \to H_{\gamma} O \tag{(A)}$$

ترکیب گازهای خروجی از استک و ورودی میکروتوربین را میتوان با حل همزمان سه معادله ثابتهای تعادل و معادله ضریب مصرف سوخت در استک (معادلات ۱۱–۹) به دست آورد:

$$Kpr = \frac{(x-y)(\tau x+y-z)}{(n_{CH\tau}-x)(n_{H\tau}-x-Y+Z)(n_{CH\tau}+n_{H\tau}+n_{T\tau}+\gamma x)} \times \left(\frac{P_{tot}}{P_{u}}\right)^{\gamma}$$
(9)

$$Kps = \frac{y(rx+y-z)}{(x-y)(n_{H+Q}-x-y+z)}$$
(1.)

$$z = U_f(\mathbf{r}x + \mathbf{y}) \tag{11}$$

از حل سه معادله فوق، سه مجهول x و y و z که به ترتیب نمایانگر میزان متان مصرفی در معادله ۱، میزان کربن مونوکسید مصرفی در معادله ۲ و میزان هیدروژن مصرفی در معادله ۸ می باشند، محاسبه می شوند.

چگالی جریان پیل سوختی (i) و ولتاژ نهایی آن توسط معادلات (۱۲ و ۱۳) محاسبه می شود:

$$i = \frac{snF}{N_d \times A} \tag{1Y}$$

$$V = V_{r\sigma} - V_{\sigma} - V_{\sigma} - V_{IR} - V_{\sigma on} \tag{(17)}$$

ولتاژ نهایی برابر اختلاف ولتاژ مدار باز یا به عبارتی برگشتپذیر با جمع تمامی انواع افتهای ولتاژ است. افتهای ولتاژ شامل افت فعالسازی<sup>۱</sup> در آند و کاتد (VcوVa)، افت ناشی از انتقال جرم<sup>۲</sup> (غلظت Vcon)، و افت اهمیک<sup>۳</sup> (Vohmic) است. ولتاژ برگشت پذیر سلول (Vre) پیل سوختی اکسید جامد به وسیله معادله نرنست<sup>۴</sup> و توسط رابطه (۱۴) به دست میآید. افت پتانسیل فعالسازی در آند (Va) به علت کوچک بودن جریان داخل آند از طریق معادله (۱۵) به دست میآید. افت پتانسیل فعالسازی در کاتد (Va) توسط معادله تافل<sup>۵</sup> (معادله ۹۲) و همچنین افت پتانسیل اهمیک (Vohmic) با توجه به معادله (۱۷) به دست میآید. مقاومتهای مواد الکترولیت، آند، کاتد و اتصالات در جدول ۲ آورده شده است.

$$V_{re} = -\frac{\Delta G}{rF} + \frac{RT}{rF} \ln\left(\frac{P_{H_{\tau}} \times P_{Q_{\tau}}}{P_{H_{\tau}Q}}\right)$$
(14)

$$V_a = \frac{RT}{nFi} i \tag{10}$$

$$V_c = \frac{RT}{\beta_{\rm NF}} \ln \left(\frac{i}{i}\right) \tag{19}$$

- 1) Activation loss
- ۲) Concentration loss
- ۳) Ohmic loss
- ۴) Nernst
- ۵) Tatel equation

$V_{IR} = i\sigma_{\sigma} \times d_{\sigma} +$	$i l \pi \sigma_{ic} \times \frac{c}{v}$	$\frac{l_{i\sigma}}{v_{i\sigma}} + \frac{i\pi l^{7}}{\Lambda} \left( \frac{\Omega \text{ cm}}{\Omega \text{ cm}} \right)$	$\left(rac{\sigma_c}{d_c} + rac{\sigma_a}{d_a} ight)$ مقاومت مواد	جدول ۲)		
	$\sigma_{ic}$	σ <sub>e</sub>	σο	σα	دما (K)	
	١	۵۰	۰.۰۲	۰.۰۰۰۹	۱۰۷۳	

افت پتانسیل غلظتی (Vcon) توسط معادله (۱۸) و در نهایت توان خروجی از پیل سوختی اکسید جامد (Wsofc) توسط معادله (۱۹) محاسبه می شود. همچنین معادله موازنه انرژی در استک پیل سوختی به صورت معادله (۲۰) می باشد.

$$Vcon = -\frac{RT}{nF} \ln \left(1 - \frac{i}{t_{\rm I}}\right) \tag{1A}$$

$$W_{SOFC} = znFV \times \eta_{DA} \tag{19}$$

$$\sum C_{\mathbf{p}_i} G_{\mathbf{out},i} \mathbf{T}_{\mathbf{out}} + W_{\mathbf{sofc}} + Q_{\mathbf{loss}} = \sum C_{\mathbf{p}_i} G_{\mathbf{in},i} \mathbf{T}_{\mathbf{in},i} + \sum \mathbf{r}_k (-\Delta \mathbf{H}_k)$$
(Y.)

#### ۳-۲ مدل میکروتوربین

در این بخش، کمپرسور توسط معادلات (۲۱ و۲۲) مدلسازی می شود که به ترتیب، نشانگر دمای خروجی از کمپرسور و کار مصرفی کمپرسور میباشد. برای مدلسازی توربین نیز از معادلات (۲۴ و ۲۳) استفاده شده است. در نهایت، کار خالص میکروتوربین که اختلاف کار تولیدی توربین و کار مصرفی کمپرسور میباشد، به صورت معادله (۲۵) بیان می شود. پارامترهای مورد استفاده برای مدل سازی سیستم مورد نظر در جدول ۳ ذکر شده است.

$$T_{\gamma} = T_{\gamma} \{ \gamma + \frac{\gamma}{\eta_{ac}} [\gamma - \left(\frac{p_{\gamma}}{p_{\gamma}}\right)^{\frac{Ka-\gamma}{Ka}} ] \}$$
<sup>(YY)</sup>

$$W_{ac} = m_a \times C_{p,a} (T_r - T_r) \tag{(YY)}$$

$$T_{r} = TIT\{1 - \eta_{gt} \left[1 - \left(\frac{P_{r}}{P_{r}}\right)^{1-Ka}\right]\}$$

$$(YY)$$

$$W_{gt} = \left(m_{\alpha} + m_{f}\right) \times C_{P}(TIT - T_{f}) \tag{(Yf)}$$

$$W_{mt} = W_{gt} - W_{ac} \tag{Ya}$$

 $\eta_{TOTAL} =$ 

مقدار	۔ پارامتر	مقدار	پارامتر
۸۷. ۰	بازده کمپرسور هوا	۱.۹ cm	قطر سلول (l)
۳۱.۸۹ mols <sup>-۱</sup>	دبی مولی هوای ورودی کمپرسور	۰.۱۵ cm	$({ m d}_{ m c})$ ضخامت کاتد
٨.٠	بازده توربين	•.•\ cm	ضخامت آند (d <sub>a</sub> )
٩٨.۵٪	بازده تبدیل کننده DC/AC در SOFC	•." cm	عرض اتصالات <b>(W<sub>ic</sub>)</b>
۵. •	ضريب انتقال (β)	۰.۰۱۵ cm	$({ m d}_{ m ic})$ ضخامت اتصالات
۸۰۰mA cm <sup>-۲</sup>	چگالی جریان حدی (i <sub>L</sub> )	۰.۰۱۵ cm	ضخامت الكتروليت (d <sub>e</sub> )
۵۳۰mA cm <sup>-۲</sup>	چگالی جریان تبادلی آند (.i <sub>a</sub> )	۲۶۰ cm <sup>r</sup>	ناحيه فعال سلول (A)
۲۰۰mA cm <sup>-۲</sup>	چگالی جریان تبادلی کاتد (.i)	۸.۳	نسبت فشار ميكروتوربين گازي

جدول ۳) مقادیر پارامتر اجزای اصلی سیستم ترکیبی [۱۵]

### ۴- پارامترهای کلیدی و معیار ارزیابی عملکرد سیستم

ضریب مصرف سوخت (Uf) که به صورت نسبت سوخت مصرف شده در واکنشها به سوخت فراهم شده توسط کانال تعریف می شود، توسط معادله (۲۶) بیان می شود. پارامتر نسبت بخار به کربن (rSC) نیز به صورت معادله (۲۷) تعریف می شود. در این مقاله، بازده الکتریکی کلی سیستم (ηΤΟΤ) به عنوان معیار ارزیابی عملکرد سیستم تولید توان ترکیبی در نظر گرفته شده و توسط معادله (۲۸) بیان می شود.

$$U_f = \frac{n' H_T}{n^{tot} u_r} \tag{(YS)}$$

$$rsc = \frac{n_{H_TO}}{n_{CH_T}}$$
(YY)

$$\frac{\text{rsofc} + \text{rm}}{\text{LHV} \times G_{f}}$$
(7A)

## ۵- ارائه نتایج و بحث ۵-۱- اعتبار سنجی

برای اعتبار بخشی مدل ارائه شده، نتایج مدلسازی یک سیستم ترکیبی مشابه در مقاله دوان و همکارانش [۱۵] با نتیجه مدل حاضر مقایسه شده است. پارامترهای ورودی مشابهی برای محاسبه عملکرد کلی سیستم ترکیبی، مورد استفاده قرار گرفته است. در جدول ۴ پارامترهای خروجی مدل دوان و همکارانش [۱۵] با نتایج کار حاضر مورد مقایسه قرار گرفته است.

	كروهان مرجع [١٠]	ع) معايسة تعايج تار كاط	جدون
درصد خطای نسبی	نتايج كار حاضر	مقادیر مرجع [ ۱۵]	پارامترهای اصلی
-7.7	۰.۲۱۶	•.771	چگالی جریان (`A/cm)
۳۸. ۰	۲۲۵. •	۰.۷۱۹	ولتاژ عملکردی سلول (V)

جدول ٤) مقایسه نتایج کار حاضر و مقاله مرجع [١٥]

	-	۵۱۰۰	۵۱۰۰	تعداد سلولهای پیل سوختی
	٨. •	7.7.545	۲۰۲.۸	توان SOFC (kW)
-	۹.۶	۱۱۰.۹	٨.711	توان KW) MGT)

همچنین برای تائید اعتبار مدل، نمودار بازده بـر حسب ظرفیت پیل سـوختی اکسید جامـد بـا نتایج مـدل دوان و همکارانش [۱۵] در شکل ۲ مورد مقایسه قرار گرفته است. برای این کار، نسبت بخار به کربن (۲.۲=۲SC)، ضریب مصرف سوخت (۸.۴ط)) و همچنین دمای عملکردی پیل سوختی (۵°۸۰)، ثابت در نظر گرفته میشود. نمودار شکل ۲ تغییرات بازده کلی سیستم ترکیبی را به ازای تعداد سلولهای متفاوت نمایش میدهد. نقاط قرمز رنگ، نتایج بدست آمـده از کـار دوان و همکارانش [۱۵] و نمودار آبی رنگ نمودار بدست آمده در این مقاله است که نشان دهنده اعتبار مـدل ارائـه شـده می باشد. همانطور که از نمودار مشخص است، قسمت ابتدایی نمودار شیب بیشتری دارد و بـا افـزایش ۲۵ درصـدی تعـداد سلولها در این ناحیه (۵۰۰۰–۲۰۰۰)، بازده الکتریکی به اندازه ۱۴۵ درصد افزایش می یابد، در حالی که در قسمت انتهایی نمودار، افزایش تعداد سلولها کمتر مورد توجه خواهد بود، زیرا با افـزایش ۲۵ درصـدی در تعداد سلولهای یک پیل سـوختی نمودار، افزایش تعداد سلولها کمتر مورد توجه خواهد بود، زیرا با افـزایش ۲۰ درصـدی در تعداد سلولهای یک پیل سـوختی به شدت بر روی قیمت پیل سوختی تاثیر میگذارد و از طرفی، افزایش بازده باعـث کـاهش مصـرف سـوخت و در نتیجه کاهش هزینه آن می شود، این نمودار میتواند اطلاعات مفیدی را در خصوص جابـه جـایی بین ایـن دو گزینـه در اختیار تعریار محیتی می در در محرفتی و در نتیجه



#### ۵-۲- تاثیر دمای گازهای ورودی به میکروتوربین

در سیستم ترکیبی SOFC و MGT ، پارامترهای عملیاتی و طراحی هر دو سیستم بر روی یکدیگر اثر می گذارد. به طور

خاص، TIT میکروتوربین باید به عنوان یک عامل محدود کننده در نظر گرفته شود. ارتباط بین دمای ورودی توربین و دبی سوخت ورودی (متان) در شکل ۳ نشان داده شده است. با افزایش دبی سوخت ورودی، TIT افزایش می یابد، زیرا با افزایش دبی سوخت، دما و میزان گازهای احترقی و واکنش نداده در پیل سوختی بیشتر می شود و در این صورت، با احتراق آنها دمای ورودی توربین نیز افزایش خواهد یافت. در حال حاضر، بیشینه TIT برای میکروت وربین های تجاری 2°°7 است که می توان امیدوار بود با پیشرفت فناوری در زمینه مواد استفاده شده در توربین، بهبود یابد. وقتی TIT بیشینه مقدار بخود را دارد و پیل سوختی در همان دمای عملکردی 2°۰۰۸ است، بازده سلول برابر ۶۰ درصد است که بیشینه میدان بازده در این تعداد سلول می باشد (این شرایط معادل دبی سوخت ورودی بیشینه ۱۰-Smoth و تعداد سلول ۲۹۰۰ می باشد). پیل سوختی کاهش می یابد در حالی که به صورت همزمان با توجه به نمودار شکل ۴ با افزایش تعداد سلول، دبی سوخت پیل سوختی کاهش می یابد. با کاهش چگالی جریان (i)، با توجه به معادله (۱۱)، z نیز که بیانگر میزان هیدروژن مصرفی در پیل سوختی، است کاهش یافته و در نتیجه، سوخت بیشتری وارد میکروتوربین شده و TIT افزایش می بابد. پریان پیل سوختی است کاهش یافته و در نتیجه، سوخت بیشتری وارد میکروتر بین که با افزایش تعداد سلول دو بی بایی و دودی دی پیل سوختی، است کاهش یافته و در نتیم در این نمودار، می اورد میکروتوربین شده و TIT افزایش می باد. می با





#### ۵-۳- تاثیر ضریب مصرف سوخت

نمودار شکل ۶ تاثیر ضریب مصرف سوخت (Uf) را بر عملکرد کلی سیستم ترکیبی نشان میدهد. با افزایش Uf، میزان تولید هیدروژن و در نتیجه، دمای عملکردی پیل سوختی بالا میرود و بازده الکتریکی کلی سیستم افزایش مییابـ د تـا بـه میزان بیشینه خود در ۸۸-Uf برسد. در ابتدا، با افزایش Uf، مقدار هیـدروژن شـرکت کننـده در واکـنش الکتروشـیمیایی افزایش مییابد، دمای عملکردی پیل سوختی بالا میرود و متعاقباً توان تولیدی توسط استک پیل سوختی افزایش مییابـد تـا شکل ۷ نیز نشان میدهد که با افزایش ۷ درصدی ضریب مصرف سوخت، TIT به اندازه ۱ درصد و بـه صـورت همزمـان افزایش مییابد. در نتیجه، توان خروجی میکروتوربین نیز به علت افزایش TIT بالا میرود و در نتیجه، بازده کلی سیستم افزایش مییابد. در نتیجه، توان خروجی میکروتوربین نیز به علت افزایش TIT بالا میرود و در نتیجه، بازده کلی سیستم افزایش مییابد در نتیجه، توان خروجی استک ناشی از افزایش چگالی جریان بر میزان افزایش جریـان ایجـاد شـده غلبـه افزایش مییابد که کاهش ولتاژ خروجی استک ناشی از افزایش چگالی جریان بر میزان افزایش جریـان ایجـاد شـده غلبـه میکند و لذا توان تولیدی پیل سوختی کاهش مییابد. همچنین دبی جرمی سوختهای باقیمانده در استک نیز که به عنوان ورودی میکروتوربین هستند، کاهش بیشتری یافته و در نتیجه، این دو عامل، باعث افت بـازده کلی سیستم بـه ازای Uf



#### ۵-۴- تاثیر نسبت بخار به کربن (rSC)

مقدار نسبت بخار به کربن ۲ برای انجام واکنشهای رفورمینگ متان کافی است، اما به طور معمول، از میزان بخار بیشتری به منظور ممانعت از تولید کربن به سبب واکنش تجزیه حرارتی متان استفاده میشود [۱۶]. شکل ۸ تاثیر پارامتر rSC را بر روی عملکرد کلی سیستم ترکیبی نشان میدهد. وقتی rSC افزایش مییابد، بازده کلی سیستم کاهش مییابد. زیرا با افزایش rSC، فشار جزیی بخار در استک افزایش یافته و در عین حال، فشار جزیی هیدروژن کاهش مییابد. بنابراین، هم ولتاژ عملکردی استک و هم دمای عملکردی آن کاهش مییابد و به طور کلی، توان خروجی از SOFC کاهش مییابد. اگرچه با افزایش rSC دبی گازهای ورودی به میکروتوربین افزایش مییابد و این عامل باعث افزایش توان خروجی میکروتوربین میشود، اما از آنجایی که در اینجا بازده و توان پیل سوختی نسبت به میکروتوربین بیشتر است، تاثیر نهایی و کلی افزایش rSC، کاهش بازده کلی سیستم میباشد. میتوان شکست ایجاد شده در rSC=7.۴ را اینگونه تفسیر کرد که در این نقطه، توان تولید شده در میکروتوربین به اندازهای افزایش یافته که تأثیر کاهش بازده پیل سوختی بر روی

نمودار شکل ۹ تاثیر rSC را بر روی TIT نشان میدهد. با افزایش rSC دمای گازهای ورودی به میکروتوربین کاهش مییابد، که این کاهش به صورت کلی ناشی از دو علت میباشد:

۲− با افزایش rSC، دمای استک پایین میآید و در نتیجه، با کاهش دمای گازهای ورودی بـه محفظـه احتـراق، TIT کاهش مییابد.

۲- از طرف دیگر، افزاش بخار باعث می شود سهم گازهای قابل اشتعال در محفظه احتراق کاهش یابد کـه در نتیجـه، کاهش TIT را به دنبال خواهد داشت.



۵-۵- اثر اعمال مدیریت حرارتی

دمای هوا و سوخت ورودی به استک میبایستی تا حد معینی بالا باشد تا انـرژی لازم جهـت تـأمین حـرارت سـلول و واکنشهای احیاء تأمین شود. در صورت نبود مبدل حرارتی، این حرارت باید توسط یک منبع خارجی تامین شود. با در نظـر گرفتن یک مبدل حرارتی با ضریب عملکردی ۰.۷ بر سر راه هوا و سوخت خروجی از کمپرسور، حرارت مورد نیاز برای پیش گرم کردن هوا و سوخت ورودی به استک پیل سوختی از طریق خود سیستم و با استفاده از گازهای خروجی از توربین تامین میشود. با در نظر گرفتن مبدل حرارتی هوا، دمای هوای خروجی از کمپرسور را میتوان تا اندازه TT بالا برد که میزان آن از طریق معادله (۲۹) به دست خواهد آمد.

 $T_{\rm r} = T_{\rm r} + \varepsilon (T_{Exh} - T_{\rm r}) \tag{Y9}$ 

این معادله را میتوان برای پیش گرم کردن سوخت و همچنین تولید بخار از طریق حرارت گازهای خروجی از مبدل حرارتی ابتدایی تکرار کرد. در نتیجه، این کار باعث بهبود عملکرد کلی و بازده الکتریکی سیستم ترکیبی به طور چشمگیری (به طور میانگین ۳۰.۹ درصد) میشود. تاثیر اعمال مدیریت حرارتی بر بازده الکتریکی کلی سیستم ترکیبی در ظرفیتهای مختلف پیل سوختی را میتوان در نمودار شکل ۱۰ مشاهده کرد.



شکل ۱۰) مقایسه نمودارهای بازده الکتریکی سیستم ترکیبی بر حسب تعداد سلولهای پیل سوختی، در حالت استفاده از مبدل حرارتی و در حالت عدم وجود آن

## ۶- نتیجه گیری

در مقاله حاضر، مدل سیستم تولید توان ترکیبیSOFC-MGT ارائه شده است. تأثیر ظرفیت پیل سوختی (تعداد سلولهای آن) و سایر پارامترهای کلیدی سیستم بر روی عملکرد کلی سیستم ترکیبی مورد بررسی قرار گرفته است. تأثیر پارامترهای اصلی سیستم ترکیبی SOFC-MGT با در نظر گرفتن TIT به عنوان یک شرایط محدود کننده، ارائه شدهاند. همچنین در انتها، تأثیر مدیریت حرارتی در بازیابی حرارت گازهای خروجی از میکروتوربین، برای تأمین حرارت مورد نیاز جهت پیش گرم کردن هوا و سوخت و همچنین تولید بخار مورد نیاز برای واکنشهای احیای متان داخل پیل سوختی، مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان میدهند که با حضور مدیریت حرارتی، بازده الکتریکی کلی سیستم ترکیبی ۱۷/۸ درصد افزایش می یابد. مهمترین نتایج پروژه به صورت زیر می باشد:

۱–دمای گازهای ورودی توربین یکی از مهمترین پارامتر های اثرگذار بر عملکرد سیستم میباشـد کـه افـزایش بیشـتر بازده الکتریکی سیستم ترکیبی را محدود میکند.

۲- وقتی دمای عملکردی پیل سوختی ثابت است، با افزایش تعداد سلولها و دبی سوخت ورودی، بازده تولید توان و TIT هر دو افزایش مییابد. نتایج پیش بینی میکنند که در ابتدا، با افزایش تعداد سلولها (۵۵۰۰–۴۰۰۰)، بازده کلی سیستم افزایش چشمگیری مییابد، در حالی که در انتهای نمودار و در تعداد سلولهای بالاتر (۹۰۰۰–۷۵۰۰)، افزایش تعداد سلولها تأثیر کمتری بر روی افزایش بازده داشته و در نهایت، در تعداد سلولهای بالاتر، بازده به میزان حدی خود خواهد رسید و از آن پس، افزایش تعداد سلول ها نه تنها تأثیری بر بازده نخواهد داشت، بلکه هزینه سیستم را نیز بالا خواهد برد.

۳– افزایش ضریب مصرف سوخت یک روش موثر برای افزایش عملکرد سیستم ترکیبی است که آن نیـز دارای یـک مقدار حدی میباشد (Uf=۰.۸۹) و از این مقدار به بعد، بازده سیستم با افزایش این پارامتر، کاهش مـییابـد. ایـن پارامتر میتواند بازده الکتریکی سلول را افزایش دهد، اما به طور همزمان باعث افزایش TIT میشود که این پارامتر با توجـه بـه فناوری موجود محدود میشود.

۴- افزایش نسبت بخار به کربن باعث کاهش بازده الکتریکی کلی سیستم و همچنین TIT می شود.

#### فهرست علائم

А	مساحت فعال سلول $(cm^{r})$	Por	فشار جزئی اکسیژن در سمت هوا (Pa)
$C_P$	ظرفیت گرمایی در فشار ثابت ( <sup>۱</sup> -۲ J mol)	Q <sub>loss</sub>	گرمای اتلافی استک پیل سوختی(kW)
d	ضخامت (cm)	R	ثابت گازها (`J K <sup>-</sup> ' mol)
F	ثابت فارادی، <sup>۱</sup> ۹۶۴۸۷C mol	$r_k$	دبی مولی واکنش دهنده k , ('-mol s)
$G_{f}$	دبی جریان سوخت ( <sup>۱</sup> -mol s)	r <sub>SC</sub>	نسبت بخار به کربن
Н	آنتالپی (KJ mol <sup>-۱</sup> )	SOFC	پیل سوختی اکسید جامد
i	چگالی جریان ( <sup>۲</sup> -mA cm)	t	$(^{\circ}C)$ دما
i <sub>a</sub> .	چگالی جریان تبادلی آند ( <sup>۲</sup> mA cm)	Т	دما ( <sup>°</sup> K)
i <sub>c</sub> .	چگالی جریان تبادلی کاتد ( <sup>۲</sup> -mA cm)	Τ,	دمای ورودی کمپرسور (K°)
$i_{\rm L}$	چگالی جریان حدی ( <sup>۲</sup> -mA cm)	Τ <sub>۲</sub>	دمای خروجی کمپرسور (K°)
K <sub>p</sub>	ثابت تعادل شیمیایی	Τ <sub>۳</sub>	دمای خروجی از مبدل حرارتی (K°)
K <sub>pr</sub>	ثابت تعادل واكنش رفورمينگ	T <sub>f</sub>	دمای خروجی توربین (K°)
K <sub>ps</sub>	ثابت تعادل واكنش آب-گاز شيفت	TIT	دمای ورودی توربین(K°)
1	قطر سلول (cm)	$T_{\text{Exh}}$	دمای گازهای خروجی از توربین (K 🗆 )
LHV	ارزش حرارتي پايين سوخت (`KJ Kg)	$U_{f}$	ضريب مصرف سوخت
MGT	میکروتوربین گازی	V	ولتاژ سلول (V)
n <sub>e</sub>	تعداد الکترون،های منتقل شده در هر واکنش	W <sub>AC</sub>	کار مخصوص کمپرسور ( <sup>`-</sup> kJ kg)
$n_{CHr}^{in}$	دبی مولی سوخت ورودی ( <sup>(-</sup> mol s)	W <sub>GT</sub>	کار مخصوص توربین ( <sup>`-</sup> kJ kg)
$n_{ m HrO}^{ m in}$	دبی مولی آب ورودی به پیل سوختی ( <sup>۱</sup> '-mol s)	W	توان(kW)

$n_{ m H au}^{ m r}$	دبی مولی هیدروژن واکنش دهنده ( <sup>۱</sup> - mol s)	Х	دبی مولی متان واکنش دهنده(``mol s)
$n_{\rm Hr}^{\rm tot}$	دبی مولی هیدروژن تولید شده در دو واکنش ( <sup>`-</sup> mol s)	у	دبی مولی کربن مونوکسید واکنش دهنده( <sup>`'</sup> mol s)
$n_{\rm HrO}$	دبی مولی بخاری که با متان واکش میدهد ( <sup>۱</sup> -mol s)	Z	دبی مولی هیدروژن واکنش دهنده ( <sup>`-</sup> mol s)
n <sub>CH</sub> *	دبی مولی متان ( <sup>۰</sup> mol s)	$\Delta H_{K}$	أنتالپي مولي واکنش دهنده kJ mol <sup>-۱</sup> ),k)
N <sub>d</sub>	تعداد سلولها	$\Delta G^{\cdot}$	انرژی آزاد گیپس در شرایط پیل سوختی ( <sup>۱</sup> kJ mol
Р	فشار(Pa)		حروف يونانى
Ρ.	فشار استاندارد (Pa)	β	ضريب انتقال
Ρ,	فشار ورودی کمپرسور (Pa)	$\eta_{AC}$	بازده کمپرسور
Pr	فشار خروجی کمپرسور(Pa)	$\eta_{GT}$	بلزده توربين
$P_r$	فشار ورودی توربین(Pa)	$\eta_{total}$	بازدہ الکتریکی سیستم ترکیبی
$\mathbf{P}_{\mathbf{r}}$	فشار خروجي توربين (Pa)	$\eta_{DA}$	بازده تبدیل کننده DC/AC
P <sub>sofc</sub>	فشار عملکردی سیستم پیل سوختی(Pa)		زيرنويس
$P_{H\tau}$	فشار جزئی هیدروژن در سمت سوخت(Pa)	а	آند
$\mathbf{P}_{\mathrm{HrO}}$	فشار جزئی آب در سمت سوخت (Pa)	с	کاتد

مراجع

- [v] Morgantown, W. V. (v··r). "EG&G Technical Services Fuel cell handbook". US Department of Energy.
- [γ] Litzinger, K. P. "Comparative evaluation of SOFC gas turbinehybrid options". Proc.Int. ASMETurbo ExpoConference, Reno, NV, June ۲··δ.
- [r] Calise, F., Palombo, A., Vanoli, L. "Design and partial loadexergy analysis of hybrid SOFC-GT power plant". J Power Sources, Vol. 101, pp. 170-1744, 7---9.
- [\*] Santin, M., Traverso, A., Magistri, L., Massardo, A. F. "Thermoeconomic analysis of SOFC-GT hybrid systems fed by liquid fuels". Energy, Vol. va, pp. 1-VV-1-AT, Y-1-.
- [δ] Cheddie, D., Murray, R. "Thermo-economic modeling of an indirectly coupled solid oxide fuel cell/gas turbine hybrid power plant". J Power Sources, Vol. 19δ, pp. Δ184-Λ14+, 7+1+.
- [۶] Bao, C., Shi, Y., Li, C., Cai, N., Su, Q. "Multi-level simulation platform of SOFC-GT hybrid generation system". Int J Hydrogen Energy, Vol. ۳۵, pp. ۲۸۹۴-۹, ۲۰۱۰.
- [Y] Zhang, X., Chan, S. H., Li, G., Ho, H. K., Li, J., Feng, Z. "A review of integration strategies for solid oxide fuel cells". J PowerSourcesVol. 196, pp. 566-747, 7414.
- [A] Traverso, A., Pascenti, M., Ferrari, M. L., Bertone, R., Magistri, L. (Y···Y). "Hybrid simulation facility based on commercial ··· kWe micro-gas turbine". Proc. of the ASME Fuel Cell Conference, Irvine, CA.
- [9] Agnew, D. G. (T...a)."The design and integration of the Rolls Royce fuel cell systems \MW

SOFC." In: Proc. of the ASME Turbo Expo Conference, Reno, NV.

- [11] Mueller, F., Gaynor, R., Auld, A. E., Brouwer, J., Jabbari, F., Samuelsen, G. S. "Synergistic integration of a gas turbine and solid oxid fuel cell for improved transient capability." Jornal of Power SourcesVol. 197, No. 1, pp. 179-179, 7--A.
- [17] Yang, J. S., Sohn, J. L., Ro, S. T. "Performance characteristics of a solid oxide fuel cell/gas turbine hybrid system whith various part-load control modes." Jornal of Power SourcesVol. 157, No. 1, pp. 100-157, 7-17.
- [١٣] Calise, F., Dentice, A. M., Palombo, A., Vanoli, L. "Simulation and exergy analysis of a hybrid solid oxid fuel cell (SOFC)-gas turbine system." EvergyVol. ٣١, No. ١۵, pp. ٣٢٧٨-٣٢٩٩, ٢٠٠۶.
- [14] Lai, W. H., Hsiao, C. A., Lee, C.H., Chyou, Y. P., Tsai, Y. C. "Experimental simulation on the integration of solid oxide fuel cell and micro-turbine generation system." Jornal of Power Sources Vol. 191, No. 1, pp. 18-189, 7-189.
- [1Δ] Duan, L., He, B., Yang, Y. "Parameter optimization study on SOFC-MGT hybridpower system."International Journal of Energy Rresearch, Vol. ۳δ, pp. ΥΥΊ-ΥΨΎ, Υ·۱).
- [15] He, Y. M., Zou, J. T., Zhang, Y. Y. "Abrif introduction to several new plant layouts of fuel cell and gas turbine combined cycle."Shanghai Turbine Vol. ", pp. ra-rf, r....